Aus dem Institut für Arbeits- und Sozialmedizin
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. Weichardt

UNTERSUCHUNGEN ZUR VALIDITÄT EINES TRAGBAREN LUNGENFUNKTIONSGERÄTES

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
(Theoretische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Karl-Heinz Eger
aus
Schwäbisch Hall

1980

Aus dem Institut für Arbeits- und Sozialmedizin
der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. Weichardt

UNTERSUCHUNGEN ZUR VALIDITÄT EINES TRAGBAREN LUNGENFUNKTIONSGERÄTES

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
(Theoretische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Karl-Heinz Eger
aus
Schwäbisch Hall

1980

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan:	Professor Dr. med. H. Haselmann
1. Berichterstatter:	Professor Dr. med. H. Konietzko
2. Berichterstatter:	Professor Dr. med. D. Jeschke

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG 1
2. LEISTUNGSPHYSIOLOGISCHE VORBEMERKUNGEN 2
2.1. Umstellung des Herz-Kreislaufsystems und des Atemsystems auf körperliche Leistung 2
2.2. Verhalten des Atemminutenvolumens (AMV) bei körperlicher Leistung 3
2.3. Verhalten der O_2-Aufnahme ($\dot{V}O_2$) bei körperlicher Leistung 5
3. MESSMETHODEN ZUR ERMITTLUNG DES AMV UND DER $\dot{V}O_2$ ... 6
3.1. Meßmethoden zur Ermittlung des AMV 6
3.1.1. AMV-Messung mittels offener Systeme 6
3.1.2. AMV-Messung mittels geschlossener Systeme .. 7
3.2. Meßmethoden zur Ermittlung der $\dot{V}O_2$ 8
3.2.1. $\dot{V}O_2$-Messung mittels offener Systeme 8
3.2.2. $\dot{V}O_2$-Messung mittels geschlossener Systeme .. 9
4. KRITERIEN DER MESSQUALITÄT EINES SCHNELLEN GAS-ANALYSATORS 10
4.1. Spezifität (Selektivität) 10
4.2. Empfindlichkeit 10
4.3. Genauigkeit 11
4.4. Schnelligkeit 11
4.5. Stabilität 11
4.6. Kalibrierung 12
5. MATERIAL UND METHODIK 13
5.1. Bau- und Meßprinzip des OXYCON-P 13
5.1.1. Meßprinzip der AMV-Messung 13
5.1.2. Meßprinzip der ΔO_2-Messung 15
5.2. Gasdurchfluß- und Gasdruckmessungen 18
5.2.1. Versuchsanordnung 18
5.2.2. Versuchsablauf unter Verwendung einer Elektropumpe 20
5.2.3. Versuchsablauf unter Verwendung von Preßluftflaschen 21
5.3. ΔO_2-Messungen 22
5.3.1. Versuchsanordnung 22
5.3.2. Versuchsablauf 23

Seite

6. ERGEBNISSE 24
6.1. Gasdurchfluß- und Gasdruckmessungen 24
6.2. ΔO_2-Messungen 30
7. DISKUSSION 36
7.1. AMV 36
7.2. Gasdruck 36
7.3. ΔO_2 37
7.4. Gesamtbeurteilung 38
8. ZUSAMMENFASSUNG 39
LITERATURVERZEICHNIS 40

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Bei der Bestimmung der beiden neben der Herzfrequenz wichtigsten physiologischen Leistungsgrößen - der O_2-Aufnahme und des Atemminutenvolumens - und deren Verhalten bei körperlicher Belastung war man bisher an den apparativen Aufwand eines stationären spiroergometrischen Meßplatzes gebunden. In jüngster Zeit wurde ein tragbares Seriengerät - das OXYCON-P* - zur kontinuierlichen Messung des Atemminutenvolumens (AMV) und der O_2-Aufnahme (VO_2) entwickelt. Da man dieses Gerät auch telemetrisch einsetzen kann, bietet es sich für bewegliche Belastungsmessungen am Arbeitsplatz und bei sportlicher Betätigung an (4). Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, seine Leistungsfähigkeit zu prüfen. Neben der Untersuchung der Strömungswiderstände im Meßsystem interessierte vor allem die Anzeigegenauigkeit des OXYCON-P für das AMV und für die O_2-Konzentration.

* OXYCON-P: Fa. Mijnhardt, Odijk (Holland);
deutscher Vertrieb: Fa. Hellige, Freiburg

2. LEISTUNGSPHYSIOLOGISCHE VORBEMERKUNGEN

2.1. Umstellung des Herz-Kreislaufsystems und des Atemsystems auf körperliche Leistung

Mit Beginn einer jeden körperlichen Leistung steigt der Energieumsatz, dessen Intensität am Sauerstoffverbrauch gemessen werden kann. Da das Blut das Transportorgan des Sauerstoffs darstellt, setzt eine Vielzahl nervöser, chemischer, physikalischer und hormoneller Reaktionen seitens des Herz-Kreislaufsystems ein, die alle das Ziel haben, den erhöhten peripheren Sauerstoffbedarf durch Steigerung des Herzminutenvolumens zu decken. Bis diese Mehrdurchblutung eintritt, vergeht je nach Arbeitsschwere eine Zeitspanne von ca. 2-6 Minuten, die durch anaerobe Energiegewinnung überbrückt wird. Während dieser Zeitspanne geht der Organismus eine Sauerstoffschuld ein, die durch das Vorhandensein anaerober Energiereserven (Glykogen, Kreatinphosphorsäure und ATP) ermöglicht wird (14). Das Glykogen - die größte Energiereserve - wird dabei zu Pyruvat bzw. Lactat abgebaut. Diese azidotische Milieuveränderung, die durch Anfall beider Stoffwechselprodukte resultiert, bewirkt nun ihrerseits eine Weitstellung der Widerstandsgefäße mit peripherer Mehrdurchblutung, sowie auf Grund der Rechtsverschiebung der O_2-Bindungskurve (Bohr-Effekt) eine bessere periphere Sauerstoffutilisation (11, 14, 16).

Somit steht zu Beginn jeder körperlichen Leistung die anaerobe Energiegewinnung, bei der der Organismus eine Sauerstoffschuld eingeht und eine azidotische Milieuveränderung erfährt, wobei die Sauerstoffschuld die Voraussetzung für die Auslösung der Umstellung der Herz-Kreislauffunktionen auf Leistung darstellt (11). Eine Zunahme der Herz-Kreislaufleistung bliebe unwirksam, wenn nicht gleichzeitig auch die Atmung verstärkt würde.

Die Regulation der Atmung erfolgt durch Regelkreise, in denen Erfolgsorgan und übergeordnetes Zentrum sich gegenseitig induzieren oder bremsen (positives bzw. negatives Feedback). Sobald die Leistung der an der Respiration beteiligten Strukturen (hauptsächlich Zwerchfell- und Intercostalmuskulatur) nicht den Anforderungen entspricht, wird über chemische und physikalische

Reize durch Einschaltung übergeordneter Zentren ("Atemzentrum") eine Leistungssteigerung erreicht. Solche die Atemparameter (Atemfrequenz, Atemzugvolumen und O_2-Aufnahme) beeinflussende Reize sind:

1. der CO_2-Druck des Blutes (pCO_2)
2. der pH-Wert des Blutes
3. der O_2-Druck des Blutes (pO_2)
4. Temperaturreize
5. der Hering-Breuer Reflex (durch Reizung sensibler Rezeptoren des Lungenvagus)
6. Reflexe, die von sensiblen Rezeptoren des Skelettmuskels ausgehen
7. Reflexe, die von sensiblen Rezeptoren in Atemmuskeln, Gelenken und Bändern ausgehen

Aus der Summation dieser Vielzahl von Reizen, zu denen emotionale und willkürliche psychische Einwirkungen hinzukommen, resultiert die jeweilige Quantität und Qualität der Atmung (8, 16, 17).

2.2. Verhalten des Atemminutenvolumens (AMV) bei körperlicher Leistung

Um bei körperlicher Belastung die notwendigen Mengen Sauerstoff heranzuführen, stehen dem Körper zwei Möglichkeiten zur Steigerung der Ventilation zur Verfügung. Diese sind zum einen die Steigerung der Atemfrequenz und zum anderen die Erhöhung des Atemzugvolumens. Aus Untersuchungen ist bekannt, daß die Tiefatmung ökonomischer ist als die Steigerung der Atemfrequenz und zwar hauptsächlich aus zwei Gründen:

1. wird durch die Tiefatmung eine effektive alveoläre Ventilation erreicht und
2. kommt es durch die Vertiefung der Atmung zu einer erheblichen Verbesserung des venösen Einstroms in das rechte Herz mit einer Beeinflussung des Herzschlagvolumens (Verbesserung der O_2-Aufnahme!) mit Minderung des Venendrucks. Jedoch ist eine bewußt übertriebene Tiefatmung wegen der mit der Tiefe der Einatmung zunehmenden elastischen Gegenkräfte der Lunge und des Brustkorbes als unökonomisch abzulehnen (11).

Bei steigenden "steady-state"-Stufen (siehe 2.3.) bestehen zwischen $\dot{V}O_2$ und AMV lineare Beziehungen (siehe Tabelle 1). Diese enge Korrelation bleibt bis zum maximalen "steady-state" erhalten. Dabei stellt sich ein ökonomisches Verhältnis zwischen Atemfrequenz und Atemtiefe (Atemzugvolumen) ein, wobei der Untrainierte verstärkt die Frequenzsteigerung, der Trainierte mehr die Vermehrung des Atemzugvolumens in Anspruch nimmt. Weiterhin ist für den Trainierten charakteristisch, daß das AMV bei Beginn der Arbeit schneller ansteigt und der Zustand der pulmonalen Homöostase ("steady-state") schneller erreicht wird (11, 16).

Beim Überschreiten des maximalen "steady-state" sind die linearen Beziehungen zwischen $\dot{V}O_2$ und AMV aufgehoben. Mit wachsender Sauerstoffschuld steigt das AMV weiter an, während die $\dot{V}O_2$ fast gleichbleibt. Bei der Belastungsstufe, bei der es zu einer Diskrepanz zwischen beiden Parametern kommt, kommt es gleichzeitig zu einem Anstieg des Atemäquivalents (Quotient aus AMV und $\dot{V}O_2$) als Ausdruck der geringen Ökonomie der Atmung (11, 16).

Tabelle 1: Durchschnittliche $\dot{V}O_2$ (ml/min) und AMV (l/min) bei verschiedenen Leistungsgraden. Nach: W. Plenert und W. Heine (13)

Leistungsgrad	$\dot{V}O_2$ (ml/min)	AMV (l/min)
Ruhe	150 - 300	3 - 6
leichte Leistung (60 Watt)	1.000 - 1.200	22 - 30
mittelschwere Leistung (120 Watt)	1.650 - 1.950	35 - 60
schwere Leistung (180 Watt)	2.000 - 2.600	50 - 105
kurzfristige Spitzenleistung	3.000 - 3.500	100 - 200

2.3. Verhalten der O_2-Aufnahme ($\dot{V}O_2$) bei körperlicher Leistung

Das Verhalten der $\dot{V}O_2$ ist unterschiedlich, je nachdem ob eine geringe oder eine große körperliche Leistung durchgeführt wird (siehe 2.2. und Tabelle 1). Zu Beginn einer geringen körperlichen Leistung steigt die $\dot{V}O_2$ in der sogenannten Anlaufzeit in annähernd parabolischer Kurvenform zunächst steil an. In dieser Anlaufzeit bleibt die O_2-Aufnahme hinter der der Leistung adäquaten O_2-Aufnahme zurück. Infolgedessen entsteht eine O_2-Schuld (O_2-Defizit nach Hill) mit proportionalem Anstieg des Lactats im Muskel. Nach der Anlaufzeit wird bei gleichbleibender Dauerleistung eine Phase gleicher O_2-Aufnahme erreicht, die über die gesamte Arbeitszeit konstant bleibt. Diese Phase gleicher O_2-Aufnahme wird nach Hill als "steady-state" bezeichnet und ist Ausdruck einer Homöostase der kardiopulmonalen Funktionen. Nach Leistungsende beobachtet man annähernd ein spiegelbildliches Verhalten der $\dot{V}O_2$ mit einem exponentiellen Abfall. In dieser Erholungsphase wird die während der Leistung eingegangene O_2-Schuld nachgeatmet. Die noch erhöhte O_2-Aufnahme dient dabei hauptsächlich der Oxydation der während der Leistung entstandenen Stoffwechselprodukte Lactat und Pyruvat. Die Dauer dieser Erholungsphase ist wie die der Anlaufzeit der Größe der körperlichen Leistung direkt und der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit umgekehrt proportional (8, 14, 16).

Ganz anders sieht der Verlauf der VO_2 bei einer schweren körperlichen Leistung aus. Hierbei steigt die VO_2 kontinuierlich bis zu einem Grenzwert (maximales O_2-Aufnahmevermögen) an, der den Abbruch bzw. die Minderung der Leistung erzwingt. Der O_2-Bedarf ist hier also höher als die maximale VO_2 sein kann. Solche Leistungen mit wachsender O_2-Schuld werden als "unsteady-state" Leistungen bezeichnet (8, 16).

3. MESSMETHODEN ZUR ERMITTLUNG DES AMV UND DER $\dot{V}O_2$

3.1. Meßmethoden zur Ermittlung des AMV

Bei der Ermittlung des AMV kommen "offene" und "geschlossene" Meßsysteme zur Anwendung (8, 19).

3.1.1. AMV-Messung mittels offener Systeme

Offen heißt ein Meßsystem, wenn der Proband durch ein Ventil Außenluft inspiriert und das Exspirationsvolumen mit verschiedenen Methoden gemessen und analysiert wird.
Zu diesen offenen Meßsystemen werden folgende vier verschiedene Geräte gezählt:

1. Spirometer
2. feuchte Gasuhr
3. trockene Gasuhr
4. Pneumotachograph

ad 1.:
Die einfachste AMV-Messung ist eine Sammlung der Exspirationsluft über einen festgesetzten Zeitraum in einem Douglas-Sack mit anschließender Messung in einem Spirometer.
Einfachste Spirometer bestehen - entsprechend dem Prinzip von Krogh - aus zwei luftdicht übereinandergeschobenen, verschieblichen Zylindern. Die obere Spirometerglocke ist durch ein Gegengewicht ausgeglichen und taucht in ein Wasserbad ein. Die Volumenänderungen dieser ausbalancierten Tauchglocke können nun über einen Schreibhebel auf der berußten Papierfläche einer Kymographentrommel registriert werden (8, 19).

ad 2.:
Bei den feuchten Gasuhren - Ein- und Ausgangsöffnungen liegen über einer Sperrflüssigkeit wie Wasser oder dünnflüssige Öle - verwendet man eine Meßtrommel mit mehreren Kammern bestimmter Größe, in die das zu messende Gas auf der einen Seite einströmt und auf der anderen Seite ausströmt. Durch den Druckunterschied der sich füllenden und entleerenden Kammern wird die Meßtrommel in drehende Bewegung versetzt, wodurch ein immer gleiches Kammer-

volumen vom Eingangsstrom abgetrennt und gemessen wird. Diese Trommelumdrehungen und damit die Zahl der Kammerfüllungen bekannter Volumina werden durch ein in Litern geeichtes Zählwerk fortlaufend registriert (8).

ad 3.:
Die trockenen Gasuhren (siehe auch 5.1.1.) bestehen aus zwei Kammern, die durch lederne Zwischenmembrane in je zwei Halbkammern geteilt sind. Bei Füllung der einen Halbkammer wird die andere entleert. Die Ledermembrane übertragen ihre Bewegung über ein Hebelsystem auf eine Kurbelwelle, die die Halbkammern wechselweise füllt und entleert und gleichzeitig ein Meßwerk bewegt. Zusätzlich könnte nach der Probevolumenmethode (siehe auch 3.2.1. ad 2.) kontinuierlich ein variables Teilvolumen zur Analyse von O_2 oder CO_2 abgesaugt werden (8).

ad 4.:
Die Pneumotachographen beruhen prinzipiell auf dem Poiseuilleschen Gesetz. Dabei ist die Fließgeschwindigkeit bei laminarer Strömung in einem engen starren Rohr dem Druckverlust pro Längeneinheit direkt proportional. Wird nun der Druckunterschied zwischen zwei Punkten des Rohres registriert, ergibt sich eine Differentialkurve (das Pneumotachogramm), bei der die Ordinaten der jeweiligen Geschwindigkeit des Atemstromes und dem Atemzeitvolumen direkt proportional sind (8).

3.1.2. AMV-Messung mittels geschlossener Systeme (siehe 3.2.2.)

Geschlossen heißt ein Meßsystem, wenn der Proband in ein geschlossenes Luftsystem mit konstantem Volumen und Druck atmet. Die Temperatur wird durch einen Thermostaten konstant gehalten. Eine in das System eingeschaltete Spirometerglocke (meist gekoppelte Doppelspirometer) zeigt alle durch die Versuchsperson, aber auch durch andere Faktoren (Temperaturänderungen, Verschiebung der Atemlage, evtl. CO_2-Rückatmung, Undichtigkeit des Systems) bewirkte Volumenänderungen auf einem Kymographen mit geeichtem Registrierpapier an (8, 19).

3.2. Meßmethoden zur Ermittlung der $\dot{V}O_2$

Auch bei der $\dot{V}O_2$-Messung unterscheidet man offene und geschlossene Meßsysteme.

3.2.1. $\dot{V}O_2$-Messung mittels offener Systeme

Die zur Sauerstoffanalyse erforderliche Exspirationsluft wird je nach Untersuchungsziel nach der Gesamtvolumenmethode und nach der Probevolumenmethode gesammelt. Der Sauerstoff wird anschließend entweder auf chemischem oder physikalischem Wege quantitativ analysiert.

Bei der Gesamtvolumenmethode wird die Exspirationsluft in einem 100 l bis 300 l fassenden Douglas-Sack gesammelt. Man erhält mit dieser Methode Mischexspirationsluft. Schnelle Änderungen der O_2-Aufnahme können nicht erfaßt werden. Ein wesentlicher Vorzug ist das Fehlen von Atemwiderständen bei großen Leistungen und Maximalleistungen. Nach Beendigung der Untersuchung kann man mittels Pipetten oder Glasspritzen Mischluft aus dem Douglas-Sack zur O_2-Analyse entnehmen.

Bei der Probevolumenmethode wird während der Untersuchung kontinuierlich mittels Pipette oder elektrischer Pumpe ein variables Teilvolumen zur Analyse abgesaugt. Auf diese Weise arbeiten die Mischgasflasche, die Gasuhr nach Zuntz, Kofranyi und Michaelis sowie der von Wolff entwickelte "Integrating Motor Pneumotachograph" (IMP), (8).

Zur chemischen Gasanalyse ist das Verfahren nach Haldane geeignet, das die O_2-Bindung von Pyrogallol verwendet bzw. die daraus resultierende Volumenminderung der Luftprobenmenge bestimmt. Das Gasanalysegerät nach Scholander ermöglicht eine O_2-Messung schon bei kleinen Gasvolumina von 0,5 cm^3. Bei dieser Methode wird der Sauerstoff von einer Lösung aus Natriumdithionid und anthrachinonsulfonsaurem Natrium absorbiert und die Volumenabnahme mittels einer Mikrometerschraube gemessen. Nach einer Methode von Krogh können sogar noch kleinere Gasvolumina (unter 7 mm^3) in einer geeichten Thermometerkapillare absorptiv auf O_2 mit einer Meßgenauigkeit von 0,2 Vol% gemessen werden (1, 8, 12).

Die physikalischen Methoden beruhen auf den verschiedenen physikalischen Eigenschaften der Luftgase. So kann der O_2-Gehalt der Exspirationsluft auf Grund der Abhängigkeit ihrer Wärmeleitfähigkeit von Zusammensetzung und O_2-Gehalt bestimmt werden. Nach diesem Prinzip sind von Hill die ersten Atemluftanalysen durchgeführt worden. Der O_2-Gehalt kann auch auf Grund der paramagnetischen Eigenschaften des Sauerstoffes mit seiner Abhängigkeit von der Temperatur mit Entstehung eines "magnetischen Windes" bestimmt werden. Die Einstellzeit bei diesen Geräten ist sehr kurz. So wurde z.B. ein Gerät mit einer Ansprechzeit von weniger als 150 msec entwickelt. Durch die Möglichkeit gleichzeitiger Analyse mehrerer Gase ist die massenspektrometrische Gasanalyse allen anderen Verfahren überlegen. Bei dieser Methode werden die Moleküle des zu untersuchenden Gases in einer Hochvakuumröhre ionisiert, in einem elektrischen Feld beschleunigt und in einem Magnetfeld entsprechend ihrer Masse und Ladung von ihrer Bahn abgelenkt und somit voneinander getrennt. Die so getrennten Ionen werden in Faradaykäfigen aufgefangen und ihre Anzahl elektrisch bestimmt. Solche Massenspektrometer sind zuerst von Hipple und Neuert in den USA entwickelt worden. Während obige drei physikalischen Methoden für laufende Registrierungen während ergonometrischer Leistungen geeignet sind, kann man bei der interferometrischen Methode keine fortlaufende Gasanalyse betreiben. Das Prinzip beruht auf den unterschiedlichen Lichtbrechungsindex von Gasen, der in Abhängigkeit von bekannter Schichtdicke und der Konzentration des zu analysierenden Gases zu Verschiebungen des Interferenz-Streifenbildes gegen das eines bekannten Vergleichsgases führt (1, 8, 12).

3.2.2. $\dot{V}O_2$-Messung mittels geschlossener Systeme (s.a. 3.1.2.)

Zu diesen technisch aufwendigen Meßsystemen zählen unter anderem der Knippingsche Spirograph, der Metabograph nach Fleisch sowie der Pulmostat der Firma Godart. Diese Geräte werden heutzutage nur noch selten verwendet (8).

4. KRITERIEN DER MESSQUALITÄT EINES SCHNELLEN GASANALYSATORS

Die Meßqualität eines Analysegerätes wird von ganz verschiedenartigen Kriterien bestimmt, die je nach Anwendung eine unterschiedliche Gewichtung erhalten. Wesentliche Begriffe, die zur Charakterisierung der Meßqualität benutzt werden, sind:

4.1. Spezifität (Selektivität)

Die verwendete Meßmethode soll für das interessierende Gas spezifisch (selektiv) sein, d.h. das Meßsignal soll nur auf dem jeweils interessierenden Gas beruhen und soll nicht durch andere Komponenten des zu analysierenden Gasgemisches beeinflußt werden. Falls der Analysator auch auf andere Gase reagiert, so wird dies als Querempfindlichkeit (cross sensitivity) bezeichnet. Je nach angewandtem Meßprinzip beruht eine solche Querempfindlichkeit auf ähnlichen physikalischen oder chemischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Lichtabsorption, Masse. Bei unterschiedlichen Meßprinzipien sind also auch unterschiedliche Querempfindlichkeiten zu erwarten.
Als Querempfindlichkeit im weiteren Sinne können sich auch Dichte-, Viskosität- oder Temperaturänderungen auswirken und die Meßbedingungen ändern (15).

4.2. Empfindlichkeit

Unter Empfindlichkeit versteht man die kleinste Konzentration bzw. die kleinste Konzentrationsdifferenz eines Gases, die noch meßbar ist. Sie entspricht auch der Nachweisgrenze und sollte eine Zehnerpotenz unter der routinemäßig interessierenden minimalen Konzentration liegen (15).

4.3. Genauigkeit

Bei den meisten Geräten entspricht die Meßgenauigkeit der Nachweisgrenze. Dies wird durch Einbau einer elektronischen Nullpunktunterdrückung erreicht, sodaß das Meßsignal für jede Vergleichkonzentration auf Null eingestellt werden kann.
Bei anderen Geräten wird die Genauigkeit in % der jeweiligen Skalenbreite angegeben und ist damit von der verwendeten Meßsignalverstärkung abhängig.
Die Genauigkeit ist um so größer, je langsamer der Meßvorgang ist oder je größer das Probevolumen gewählt wird. Da nun beides bei kontinuierlicher Analyse eine Verminderung der Meßgeschwindigkeit bedeuten würde, muß man zwischen diesen beiden Eigenschaften zu einem Kompromiß kommen (15).

4.4. Schnelligkeit

Der Begriff Schnelligkeit beinhaltet einmal die Zeit vom Einbringen einer Probe bis zum Beginn eines Signals - die Totzeit - zum anderen die Zeit vom Beginn eines Signals bis zum Erreichen von 63%, 90% oder 95% des definierten Signals für diese Gaskonzentration - die Einstellzeit.
Die Totzeit führt lediglich zu einer Verspätung der Signalantwort und ist nur dann von Bedeutung, wenn verschiedene Parameter simultan registriert werden sollen.
Die Einstellzeit, die einen exponentiellen Signalverlauf aufweist, ist vor allem bei kontinuierlichen Analysen wichtig, da sie kürzer sein muß als die Geschwindigkeit der Änderung, die man untersuchen möchte (15).

4.5. Stabilität

Mit der Stabilität wird die Reproduzierbarkeit eines Meßwertes bezüglich Nullpunkt und Empfindlichkeit charakterisiert. Für die meisten Anwendungen ist vor allem die Kurzzeitstabilität von Bedeutung, d.h. die Reproduzierbarkeit innerhalb von Minuten oder

allenfalls von Stunden, nach denen eine erneute Kalibrierung erforderlich ist. Dies kann die Empfindlichkeit, den Nullpunkt oder beides betreffen. Die Änderung des Nullpunktes oder der Empfindlichkeit wird in % / Zeit angegeben und als Drift bezeichnet. Bei zweiseitigen Schwankungen gibt man die Standardabweichung des Signals an (15).

4.6. Kalibrierung

Zwei Eichpunkte genügen, wenn die Kalibrierkurve des Analysators linear ist; bei nicht linearen Kalibrierkurven müssen entsprechend mehr Eichpunkte bekannt sein.
Grundsätzlich sollte die Kalibrierung immer in demjenigen Bereich und unter möglichst genau den Bedingungen durchgeführt werden, die auch bei der eigentlichen Messung zu erwarten sind.
Sofern man keine Kalibrations-Gasgemische fertig beziehen kann, müssen die gewünschten Gemische entweder mit einer Referenzmethode geeicht werden, oder man stellt sich aus reinen Gasen mittels Gasmischpumpe, deren Charakteristika genau bekannt sind, die gewünschten Gemische her (15).

5. MATERIAL UND METHODIK

5.1. Bau- und Meßprinzip des OXYCON-P

Das OXYCON-P der Firma Mijnhardt, Odijk (deutscher Vertrieb: Fa. Hellige, Freiburg) ist ein tragbares Meßgerät zur kontinuierlichen Bestimmung des AMV und der $\dot{V}O_2$.
Das OXYCON-P besteht aus zwei Teilen:

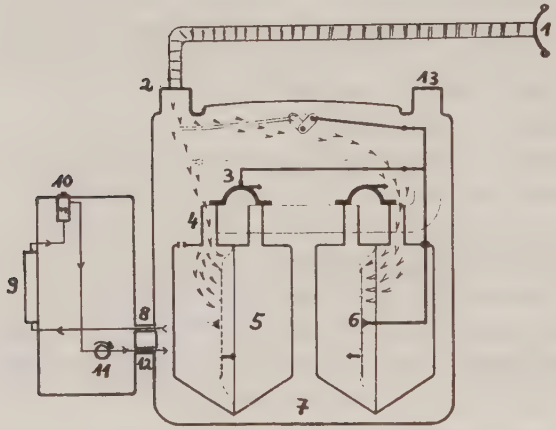
1. einem kompakten, tragbaren Teil (t-Oxycon), welcher eine trockene Gasuhr und den Sauerstoffanalysator enthält;
2. einer stationären Kontrolleinheit (s-Oxycon) mit Digitalanzeige für AMV und ΔO_2 (Differenz des O_2-Gehaltes zwischen Außen- und Exspirationsluft) oder $\dot{V}O_2$ (20).

Beide Teile können per Draht (drahtgebundene Telemetrie) oder mittels Funk (drahtlose Telemetrie) miteinander verbunden werden (7).

5.1.1. Meßprinzip der AMV-Messung

Das AMV wird mittels einer trockenen Respirationsgasuhr (siehe 3.1.1.) gemessen, die nach dem Prinzip des Max-Planck-Institutes für Arbeitsphysiologie in Dortmund nach früheren Modellen von Müller-Franz, Kofranyi und Michaelis entwickelt wurde (8, 9).
Wie Abbildung 1 grobschematisch zeigt, ist die Gasuhr in dem zylindrischen Gasmischbehälter quasi aufgehängt und steht mit diesem durch vier Eintrittsöffnungen in direkter Verbindung.
Die Gasuhr mit einer Gesamtkapazität von 2 l besteht aus einem Gehäuse mit zwei getrennten Meßkammern, die durch ein Schiebeventil- und Hebelsystem verbunden sind. Jede Meßkammer wiederum ist durch eine metallverstärkte Ledermembran in zwei gleichgroße Halbkammern von je 500 cm^3 Inhalt aufgeteilt.
Die Messung des AMV läuft folgendermaßen ab (Abb. 1): Der Proband atmet Außenluft ein und über Gesichtsmaske, Ventilationsschlauch und t-Oxycon-Eingang in das Gasmischbehälter-Gasuhrensystem aus. Durch zwei offene Gasuhreingangsstutzen (Abb. 1-4) gelangen die Atemgase in die dazugehörigen Halbkammern. Durch die stetige Füllung dieser beiden Halbkammern verschiebt das Atemgemisch die zwei metallverstärkten Ledermembranen (Abb. 1-6) und verdrängt die Gase aus den benachbarten Halbkammern. Diese Membranbewegungen betäti-

Abbildung 1: Schematische Darstellung des t-Oxycon



1 - Gesichtsmaske mit Ventilationsschlauch
2 - t-Oxycon-Eingang
3 - Schiebeventil-Hebelsystem
4 - Gasuhreingangsstutzen
5 - Halbkammer (mit 500 cm^3 Inhalt)
6 - bewegliche metallverstärkte Ledermembran
7 - Gasmischbehälter
8 - O_2-Muster-Ausgang
9 - Silicagelabsorber ("Dryer")
10 - O_2-Analysator (O_2-Doppelzelle)
11 - elektrische Pumpe (Leistung von 250 ml/min)
12 - O_2-Muster-Eingang
13 - t-Oxycon-Ausgang

gen das Schiebeventil- und Hebelsystem, das nach vollständiger Auffüllung beider beteiligter Halbkammern - durch Schließen der zuvor offenen und durch Öffnen der zuvor geschlossenen Gasuhr-eingangsstutzen - eine Umlenkung der Atemgase bewirkt. Nach dieser Umlenkung der Gasströmung durch das Schiebeventil- und Hebelsystem können die Atemgase in die "leeren" Halbkammern einströmen, womit sich der Vorgang von oben wiederholt.
Die Bewegungen des Schiebeventil- und Hebelsystems bewirken die Drehung einer Welle mit einer Stroboskopscheibe. Ein photoelektrischer Impulsgenerator erzeugt mit Hilfe der Stroboskopscheibe bei jeder Teilumdrehung elektrische Signale. Bei einer vollen Umdrehung der Stroboskopscheibe werden 50 Impulse erzeugt, was - ein Impuls entspricht einem Gasvolumen von 0,1 l - einem Gasvolumen von 5 l entspricht. Diese Signale werden zur elektronischen Verarbeitung zum Rechnersystem des s-Oxycon übertragen und in Minutenabständen digital angezeigt. Nach erfolgter Messung verläßt das Atemgemisch die Gasuhr durch den t-Oxycon-Ausgang (Abb. 1-13), der keine Verbindung mehr zum Gasmischbehälter (Abb. 1-7) hat (20).

5.1.2. Meßprinzip der ΔO_2-Messung

Vom Gasmischbehälter (Abb. 1-7), in dem die Exspirationsluft homogen durchmischt wird, wird mittels einer elektrischen Pumpe (Abb. 1-11) mit einer Leistung von 250 ml/min kontinuierlich ein Probevolumengasgemisch (O_2-Muster) abgesaugt. Das Probevolumen (siehe 3.2.1.) verläßt den Gasmischbehälter durch einen kleinen Seitenstutzen (O_2-Muster-Ausgang, Abb. 1-8) und gelangt, nachdem es zuvor im Silicagelabsorber (Abb. 1-9) getrocknet wurde, zum O_2-Analysator (Abb. 1-10). Dort werden die Sauerstoffkonzentrationen der Inspirationsluft (Außenluft) und der Exspirationsluft des Probanden durch eine Doppelzelle nach dem polarographischen Prinzip (s.u.) gemessen. Beide Zellen sind in einem Block zusammengebaut und thermisch verbunden, sodaß - bei konstanter Ausgangsspannung an beiden Meßzellen - das Verhältnis beider Stromstärken dem Verhältnis beider O_2-Konzentrationen entspricht. Da die O_2-Konzentration der Inspirationsluft mit 20,94 Vol% O_2 bekannt ist, kann die O_2-Abweichung der Exspirationsluft des Probanden direkt als Sauerstoffdifferenz

(ΔO_2) in Vol% O_2 angezeigt werden.
Nach kontinuierlicher Messung der O_2-Konzentrationen und nach digitaler Anzeige des Mittelwertes durch ein averaging module werden die Probevolumina wieder dem Gasmischbehälter (O_2-Muster-Eingang, Abb. 1-12) zugeführt. Da der Gasmischbehälter keinen eigenen Ausgang hat und die Probevolumina nach erfolgter Analyse in die Gasuhr geleitet werden, lassen sich volumetrische Meßfehler vermeiden.
Die Aufforderung in der Gebrauchsanweisung, den Probanden vor der eigentlichen Messung drei Minuten in das t-Oxycon exspirieren zu lassen, dient dazu, eine gute Durchmischung der Atemgase im Gasmischbehälter zu erreichen.
Nachfolgende Ausführungen sollen das polarographische Prinzip der O_2-Meßzelle erklären.
Die älteren O_2-Zellen bestehen aus einem galvanischen Element mit Blei als Anode und mit Silber als Kathode. Als unterstützender Faktor dient ein gut leitender Elektrolyt, der auf keine sekundären Reaktionen der übrigen Gase eingeht, die ebenfalls durch die Membrane diffundieren können (wie z.B. CO, CO_2 - siehe 4.1.).
Die O_2-Meßzelle hat nachstehende elektrolytische Wirkungen:
Bei geschlossenem Kreislauf (Anlegen von Gleichstrom) werden die Elektronen von der Anode abgesaugt und der Kathode zugeführt. Der Bleielektrode werden Elektronen entzogen:

$$Pb \longrightarrow Pb^{2+} + 2e^-$$

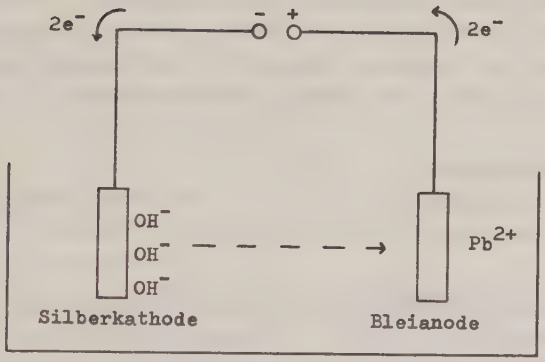
Die zwei Elektronen werden zur Kathode gepumpt, wo sie bei Vorhandensein von Sauerstoffmolekülen OH^--Ionen freisetzen:

$$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2\ OH^-$$

An der Bleielektrode neutralisieren die Pb^{2+}- und die OH^--Ionen sich zu $Pb(OH)_2$.
Bis zum Erreichen des chemischen Gleichgewichts läuft somit - alle Reaktionen zusammengefaßt - folgender Vorgang ab:

$$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + Pb \longrightarrow Pb\ (OH)_2$$

Abbildung 2: Elektrolytische Wirkungen eines galvanischen Elements mit einer Bleianode und einer Silberkathode



Auf Grund der Polarisation der Kathode durch das Meßgas ist die an der Kathode befindliche Menge an Sauerstoff ein Maßstab für die Anzahl der bewegten Elektronen innerhalb dieses Kreislaufes. Durch die Entstehung von $Pb(OH)_2$ nimmt der Innenwiderstand zu - die Zelle altert. Bei unterbrochenem Kreislauf findet an der Kathode eine O_2-Anreicherung statt, welche nach Schließung des Kreislaufes einen vermehrten OH^-Ionenanfall zur Folge hat - die Alterung der Zelle wird beschleunigt. Deshalb geschieht die Aufbewahrung der nicht gebrauchten Zelle in destilliertem Wasser unter Luftabschluß (2, 3, 20).

Seit mehreren Jahren werden O_2-Zellen mit der Typenbezeichnung IBC verwendet. Diese O_2-Zellen haben Gold- bzw. Silberelektroden. Über die chemische Natur des Elektrolyts konnten von der Herstellerfirma keine Angaben erhalten werden.

5.2. Gasdurchfluß- und Gasdruckmessungen

5.2.1. Versuchsanordnung

Folgende Geräte kamen zur Anwendung:

1. Elektropumpe

An dem mit einem Schlauch armierten Ansaugstutzen konnte mit Hilfe einer Quetschklemme mit Rädelschraube die Luftzufuhr der Elektropumpe so verändert werden, daß die Pumpleistung von 2 l/min bis zu 45,5 l/min variiert werden konnte.

2. Preßluftflaschen

Bei Pumpleistungen von mehr als 45 l/min wurden Preßluftflaschen von 50 l Inhalt mit dazugehörigem Ventil verwendet.

3. Exsperimentiergaszähler der Fa. Elster (Typ NB 3)

Diese Gasuhr der Fa. Elster AG in Mainz-Kastel arbeitet nach dem "two-bag" System, dem gleichen Prinzip wie die Gasuhr des OXYCON-P. Während bei der Gasuhr des OXYCON-P die Bewegungen des Schiebeventil- und Hebelsystems eine Stroboskopscheibe in Bewegung setzen, die ihrerseits die Impulsgebung bestimmt, werden sie bei der "Elster-Gasuhr" auf eine Kurbelwelle übertragen, die das Zählwerk antreibt. Zählwerk und Zeiger können von Hand auf Null gestellt werden. Der garantierte Meßfehler liegt unter 2%. Weiterhin wurde vom Hersteller versichert, daß Rohrverengungen, Krümmungen sowie Absperrorgane die Meßgenauigkeit nicht beeinflussen.

4. Gasmanometer

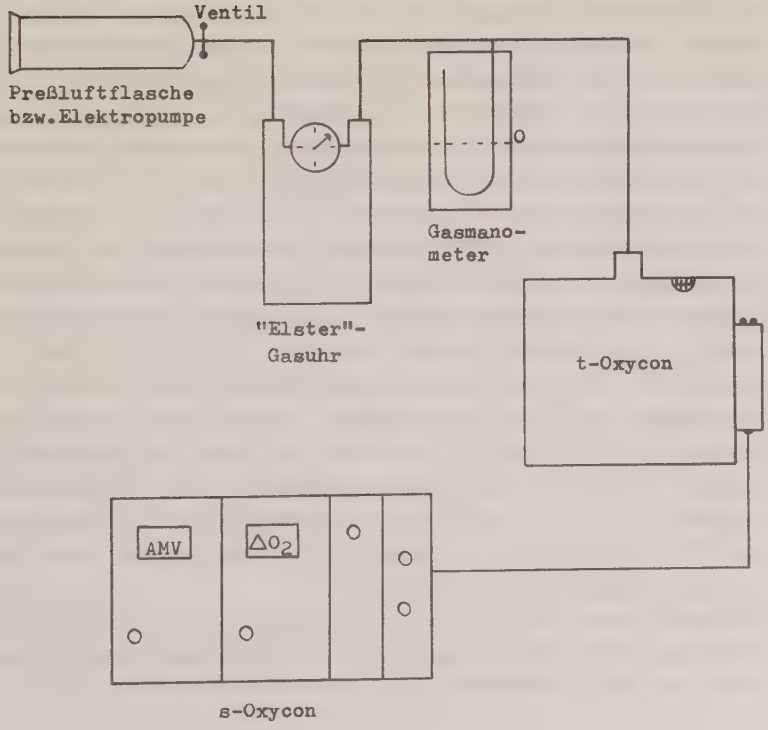
Um den Gasdruck vor dem tragbaren Teil des OXYCON-P zu ermitteln, wurde ein Gasmanometer konstruiert. Es kam ein U-Rohr zur Anwendung, das zur besseren Sichtbarmachung mit gefärbtem Wasser gefüllt wurde. Dieses U-Rohr wurde etwa 15 cm vor dem Eingang des OXYCON-P mittels eines T-Stückes angebracht. Das Flüssigkeitsmanometer wurde mit einem dahintergelegten Millimeterpapier in mm Wassersäule (WS) als Druckeinheit bei jeder Durchflußrate abgelesen.

5. OXYCON-P

Die nachfolgenden Gasdurchfluß- und Gasdruckmessungen wurden ohne Ventilationsschlauch und Gesichsmaske durchgeführt.

Abbildung 3 gibt schematisch die Anordnung oben aufgeführter Geräte wieder, die durch flexible Schläuche mit einem lichten Durchmesser von 1 cm verbunden wurden.

Abbildung 3: Versuchsanordnung bei den Gasdurchfluß- und Gasdruckmessungen



5.2.2. Versuchsablauf unter Verwendung einer Elektropumpe

Vor jeder Versuchsreihe (≙ 10 Meßdurchgängen, siehe Tabelle 2) wurde durch willkürliches Drehen an der Rädelschraube der Elektropumpe der Gasdurchfluß der Versuchsanordnung festgelegt und nach Ablesen der "Elster-Gasuhr" als Eichwert protokolliert.

Mit dem Aufleuchten des Zeitsignals des s-Oxycon begann für den willkürlich gefundenen Eichwert der erste Meßdurchgang mit fünf Meßwerten. Beim zweiten Aufleuchten des Zeitsignals wurden die "Elster-Gasuhr", das Gasmanometer und die Digitalanzeige des OXYCON-P abgelesen und die Werte protokolliert. Nach dem dritten, vierten, fünften und sechsten Aufleuchten wurden nur noch die entsprechenden zwei-, drei-, vier- und fünf-Minutenwerte der OXYCON-P-Anzeige festgehalten. Die zwei anderen Werte, die Durchflußrate und der Gasdruck, die man für eine Versuchsreihe als konstant annehmen konnte, wurden während eines Meßdurchganges mehrmals kontrolliert und dabei ihre Konstanz bestätigt.
Mit dem sechsten Aufleuchten des Zeitsignals (nach fünf-minütiger Meßdauer ≙ fünf protokollierten Meßwerten) wurde durch Abklemmen des zuführenden Schlauches zwischen Elektropumpe und "Elster-Gasuhr" ein Meßdurchgang beendet.
Nachdem der Schlauch abgeklemmt war, wurde gewartet, bis die Digitalanzeige des s-Oxycon wiederum 00,0 zeigte. Mit dem darauffolgenden Aufleuchten des Zeitsignals wurde die Klemme entfernt - ein neuer Durchgang begann.
Die Annahme, daß nach Entfernen der Klemme der Gasdurchfluß für jeden neuen Meßdurchgang gleichbleibt, wurde durch regelmäßiges Ablesen der "Elster-Gasuhr" überprüft und letztlich erhärtet.
Nachdem auf diese Weise zehn Meßdurchgänge mit je fünf Meßwerten protokolliert waren, wurde durch willkürliches Auf- und Zudrehen der Rädelschraube ein neuer Eichwert gefunden und für diesen erneut zehn Meßdurchgänge gestartet.
Insgesamt wurden mittels der Elektropumpe 26 Eichwerte (von 3,9 l/min bis 45,5 l/min) eingestellt und pro Eichwert eine Versuchsreihe mit zehn Meßdurchgängen (≙ 50 Meßwerten) erstellt.

5.2.3. Versuchsablauf unter Verwendung von Preßluftflaschen

Zunächst wurde in mehreren Vorversuchen die Ventilöffnung herausgefunden, bei der mehr als 45,5 l/min (der Maximalleistung der Elektropumpe) aus der Preßluftflasche herausströmten. Diese Ventilöffnung wurde mittels einer Klemme zwischen Ventilaufsatz und "Elster-Gasuhr" fixiert (siehe Abbildung 3).
Mit dem Aufleuchten des Zeitsignals des s-Oxycon wurde diese Klemme entfernt. Beim zweiten Aufleuchten wurden die "Elster-Gasuhr", das Gasmanometer und die Digitalanzeige des OXYCON-P abgelesen und protokolliert. Wegen der in Vorversuchen herausgefundenen Tatsache, daß sich das Ventil verstellen kann und somit ein nicht konstanter Eichdurchfluß resultieren kann, wurde dem Ablesen der "Elster-Gasuhr" (≙ Eichwert) besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Sobald der Eichwert der "Elster-Gasuhr" vom ersten Eichwert abwich, wurde durch vorsichtiges Verändern der Ventilschraube (Korrektur des Eichwertes) wieder der ursprüngliche Eichdurchfluß eingestellt. Nachdem man für einen Eichwert mit durchschnittlich einer Korrektur fünf Meßwerte protokollieren konnte, wurde nach Abklemmen des Schlauches ein Meßdurchgang beendet.
Nachdem die Oxyconanzeige wieder 00,0 zeigte, wurde durch vorsichtiges Aufdrehen des Ventils ein etwas größerer Gasdurchfluß hergestellt. Mit dem darauffolgenden Aufleuchten des Zeitsignals wurde für den etwas höheren Eichwert als zuvor mit Entfernen der Klemme wiederum ein neuer Meßdurchgang gestartet. Somit wurde für jeden der 31 Eichwerte (45,5 l/min bis 242 l/min), die aufsteigend durch stetiges Aufdrehen des Ventils eingestellt wurden und durchschnittlich einer Korrektur bedurften, ein Meßdurchgang mit je fünf Werten durchgeführt.

5.3. ΔO_2-Messungen

5.3.1. Versuchsanordnung

Bei der ΔO_2-Messung (ΔO_2= 20,94 Vol% - x Vol%) wurden neben dem OXYCON-P vier 10 l Sauerstoffflaschen mit verschiedenen Volumenanteilen Sauerstoff benutzt, die die wichtigsten leistungsphysiologischen Bereiche abdecken:

Versuch 1: mit einem O_2-Anteil von 20,17 Vol%
(ΔO_2= 0,77 Vol%)

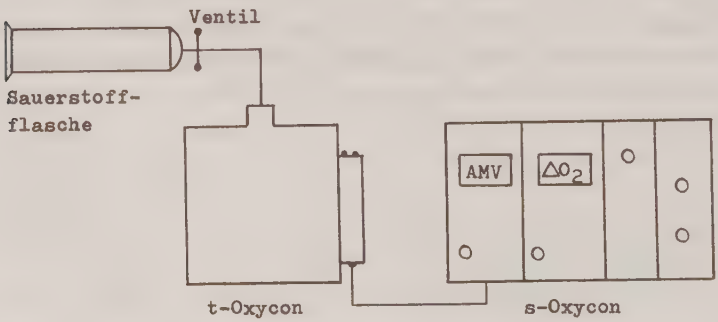
Versuch 2: mit einem O_2-Anteil von 19,20 Vol%
(ΔO_2= 1,74 Vol%)

Versuch 3: mit einem O_2-Anteil von 17,73 Vol%
(ΔO_2= 3,21 Vol%)

Versuch 4: mit einem O_2-Anteil von 16,00 Vol%
(ΔO_2= 4,94 Vol%)

Für jede dieser O_2-Konzentrationen wurden neun Teilversuche bei ansteigenden Durchflußraten (von 6 l/min bis 86 l/min) durchgeführt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Versuchsanordnung bei den ΔO_2-Messungen



5.3.2. Versuchsablauf

Zunächst wurde das OXYCON-P vorschriftsmäßig betriebsbereit gemacht. Vor Beginn des Versuchs ergab sich folgendes Bild: das Ventil der Sauerstoffflasche war geschlossen; die Digitalanzeige für das AMV und für ΔO_2 (O_2-Gehalt der Inspirationsluft minus O_2-Gehalt der Exspirationsluft : IO_2- EO_2) zeigte nach Umschalten des Wahlschalters auf "a" (Minuten-Meßwertanzeige) 00,0; das Lichtsignal für die Zeit war je nach Zeitpunkt an oder aus.

Die Versuche 1 - 4 liefen folgendermaßen ab:
Mit dem nächsten Aufleuchten des Zeitsignals wurde das Ventil der O_2-Flasche ein wenig geöffnet. Pro Minute wurden dann die beiden Digitalanzeigen AMV und ΔO_2 am s-Oxycon abgelesen und protokolliert. Nachdem die ΔO_2-Anzeige den errechneten Wert (20,94 Vol% minus x Vol% des Eichgases) erreicht hatte (identischer Wert) bzw. nachdem ein dem errechneten ΔO_2 nahestehender Wert erreicht wurde und sich dieser drei Minuten lang nicht änderte ("maßgebender" Wert), wurde der Teilversuch durch Abklemmen des Schlauches beendet.
Während abgewartet wurde, bis beide Digitalanzeigen wiederum 00,0 zeigten, wurde das Ventil ein wenig weiter geöffnet, um mit der neuen Ventilöffnung (≙ höherer Durchflußrate) einen nächsten Teilversuch starten zu können. Nach 00,0 Anzeige für das AMV und für ΔO_2 wurde mit dem darauffolgenden Aufleuchten des Zeitsignals die Klemme entfernt - ein neuer Teilversuch mit höherer Durchflußrate begann.
Nach drei solchen Teilversuchen wurde nach Vorschrift neu geeicht. Auf diese Weise konnten pro Sauerstoffflasche neun Teilversuche bei ansteigender Durchflußrate durchgeführt werden.

6. ERGEBNISSE

6.1. Gasdurchfluß- und Gasdruckmessungen

Sämtliche protokollierten Meßwerte wurden unter ATPS-Bedingungen (Umgebungstemperatur, Gasdruck der Umgebung, mit Wasserdampf gesättigt) bestimmt, da die Gasuhr des t-Oxycon und die "Elster-Gasuhr" zu den offenen Systemen gehören. Auf eine Umrechnung in BTPS-Bedingungen, die den Verhältnissen der Lunge entsprechen, wurde verzichtet, da sich ein etwaiger Fehler nach Umrechnung lediglich proportional in Abhängigkeit von den Umrechnungsfaktoren verschieben würde.
Wie Tabelle 2 ausschnittweise aus dem Versuchsprotokoll zeigt, weichen die in den einzelnen Durchgängen erhaltenen Meßwerte geringfügig voneinander ab. Ein systematischer Fehler ist dabei nicht zu erkennen. Deshalb wurden aus den 50 bzw. 5 protokollierten Oxyconanzeigewerten die Mittelwerte ($\bar{x}$) und Standardabweichungen ($\pm s$) ermittelt. Aus den Mittelwerten ($\bar{x}$) und dem jeweils zugehörigen Eichwert (E) wurde der relative Fehler nach

$$\frac{\bar{x} - E}{E} \cdot 100\ (\%)$$ errechnet.

In den Tabellen 3a und 3b wurden die vier Werte - Gasdruck, mittlerer Gasdruck, relativer Fehler der AMV-Anzeige und deren Standardabweichung - dem zugehörigen Eichwert gegenübergestellt. Der relative Fehler der AMV-Anzeige des OXYCON-P wurde außerdem graphisch dargestellt (Abbildung 5): auf der Abszisse wurde der Gasdurchfluß (l/min) in logarithmischen Maßstab, auf der Ordinate der relative Fehler der AMV-Anzeige (%) bzw. der mittlere Gasdruck (mm WS) jeweils linear aufgetragen. Man erkennt dabei deutlich, wie sich der relative Fehler mit steigender Durchflußrate zunächst fast asymptotisch der Abszisse nähert, ab einer Durchflußrate um 17 l/min aber relativ konstant einen mittleren Fehler von -1,5% aufweist. Die Streuung der Einzelwerte ist insgesamt gering und nimmt mit steigendem Durchfluß ab.
Beim Ablesen des Gasdruckes stellten sich innerhalb eines Meßdurchganges relativ große Schwankungen heraus. Die Ursache dürfte im Meßprinzip der trockenen Respirationsgasuhr des t-Oxycon zu sehen sein (siehe Abbildung 1): Bei offenen Gasuhreingangsstutzen

fließen die Atemgase unbehindert in die zugehörigen Halbkammern - ein niedriger Gasdruck stellt sich ein. Nachdem diese beiden Halbkammern gefüllt sind, kommt es durch das Schiebeventil-Hebelsystem zur Umlenkung der nachströmenden Atemgase in die beiden anderen Halbkammern. Bei dieser Umlenkung kommt es zu kurzfristigen Querschnittverkleinerungen der Gasuhreingangsstutzen, die die besagten Gasdruckspitzen vor dem t-Oxycon erklären. Aus diesem Grund wurden sowohl die Minima als auch die Maxima eines jeden Durchganges registriert und daraus der mittlere Druck errechnet. Dieser Wert gibt den Druck an, der bei einem unbehinderten stetigen Gasdurchfluß herrschen würde. Das Diagramm 5 zeigt sehr deutlich, wie mit zunehmendem Durchfluß der Gasdruck, d.h. der Widerstand erheblich zunimmt und bei einer Durchflußrate von 242 l/min sogar 90 mm WS erreicht. Auch hier sind die Streuungen der Einzelwerte relativ gering, damit ist eine hohe Reliabilität gegeben.

Tabelle 2: Gasdurchfluß- und Gasdruckmessungen
Ausschnitt aus dem Versuchsprotokoll
mit dem Eichwert 14 l/min

Eichwert: 14 l/min
Gasdruck: 2-6 mm WS

	AMV-Anzeige des OXYCON-P in der				
Meßdurchgang	1.Minute	2.Minute	3.Minute	4.Minute	5.Minute
1	13,4	13,2	13,6	13,6	14,3
2	13,4	13,4	13,6	13,4	14,1
3	13,6	13,8	13,6	13,6	13,2
4	13,6	13,4	13,4	13,8	13,2
5	14,1	13,6	13,6	13,2	13,4
6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,8
7	13,6	13,8	14,1	13,6	13,9
8	13,8	13,6	13,4	13,4	13,4
9	13,6	13,2	13,4	13,2	13,4
10	13,6	13,4	13,6	13,8	13,6

10 Meßdurchgänge ≙ 1 Versuchsreihe

Tabelle 3a: Gasdruck, mittlerer Gasdruck sowie relativer Fehler und Standardabweichung der AMV-Anzeige des OXYCON-P beim Versuch mit der ELEKTROPUMPE

	Eichwert (l/min)	Gasdruck (mm WS)	mittlerer Gasdruck (mm WS)	relativer Fehler der AMV-Anzeige (%)	Standardabweichung der AMV-Anzeige ($\pm$ s)
1.	3,9	1 - 2	1,5	-50,8	0,19
2.	4,0	1 - 2	1,5	-44,5	0,18
3.	4,2	1 - 2	1,5	-40,5	0,26
4.	4,4	1 - 2	1,5	-38,2	0,20
5.	4,7	1 - 2	1,5	-35,3	0,29
6.	5,0	1 - 2	1,5	-33,8	0,26
7.	5,7	1 - 2	1,5	-20,7	0,21
8.	6,6	2 - 3	2,5	-13,9	0,20
9.	7,0	2 - 3	2,5	-13,9	0,25
10.	7,8	2 - 3	2,5	-13,9	0,19
11.	9,5	2 - 4	3,0	- 6,2	0,12
12.	10,5	2 - 6	4,0	- 3,2	0,33
13.	13,2	2 - 6	4,0	- 3,3	0,19
14.	14,0	2 - 6	4,0	- 3,1	0,25
15.	15,3	2 - 6	4,0	- 2,8	0,21
16.	16,8	2 - 6	4,0	- 1,9	0,28
17.	18,0	2 - 8	5,0	- 2,2	0,20
18.	20,3	2 - 8	5,0	- 1,7	0,24
19.	23,0	2 - 8	5,0	- 1,4	0,19
20.	27,0	2 -10	6,0	- 1,1	0,29
21.	29,0	4 -10	7,0	- 1,3	0,24
22.	31,0	4 -10	7,0	- 1,6	0,25
23.	36,5	4 -12	8,0	- 1,6	0,19
24.	40,5	4 -12	8,0	- 2,0	0,28
25.	42,5	4 -16	10,0	- 1,7	0,24
26.	45,5	4 -18	11,0	- 2,1	0,28

Tabelle 3b: Gasdruck, mittlerer Gasdruck sowie relativer Fehler und Standardabweichung der AMV-Anzeige des OXYCON-P beim Versuch mit den PRESSLUFTFLASCHEN

	Eichwert (l/min)	Gasdruck (mm WS)	mittlerer Gasdruck (mm WS)	relativer Fehler der AMV-Anzeige (%)	Standardabweichung der AMV-Anzeige ($\pm$ s)
1.	48,5	4 - 18	11,0	-2,0	0,28
2.	51,5	6 - 18	12,0	-2,2	0,22
3.	54,0	6 - 18	12,0	-2,2	0,30
4.	58,0	8 - 18	13,0	-2,5	0,23
5.	60,0	8 - 18	13,0	-2,1	0,23
6.	61,5	8 - 20	14,0	-2,4	0,29
7.	65,0	10 - 20	15,0	-2,0	0,32
8.	68,0	10 - 20	15,0	-2,3	0,32
9.	71,0	12 - 20	16,0	-1,9	0,19
10.	75,0	14 - 20	17,0	-1,8	0,42
11.	78,0	14 - 20	17,0	-1,3	0,25
12.	82,5	14 - 22	18,0	-1,3	0,41
13.	86,0	14 - 22	18,0	-1,5	0,34
14.	89,0	14 - 22	18,0	-1,6	0,44
15.	94,0	15 - 25	20,0	-1,6	0,33
16.	98,0	15 - 25	23,0	-1,3	0,30
17.	101,0	16 - 30	23,0	-1,3	0,22
18.	107,0	16 - 30	23,0	-1,4	0,25
19.	115,0	16 - 30	23,0	-1,3	0,29
20.	122,0	20 - 40	30,0	-1,1	0,22
21.	130,0	25 - 50	37,5	-1,2	0,29
22.	140,0	30 - 80	55,0	-1,1	0,24
23.	155,0	30 - 85	57,5	-0,9	0,33
24.	161,0	40 - 80	60,0	-1,0	0,21
25.	174,0	40 - 80	60,0	-1,0	0,30
26.	180,0	40 - 95	67,5	-0,7	0,16
27.	188,0	40 - 95	67,5	-0,7	0,37
28.	200,0	45 -100	72,5	-1,1	0,11
29.	222,0	60 -100	80,0	-1,1	0,25
30.	230,0	60 -100	80,0	-1,1	0,37
31.	242,0	70 -110	90,0	-0,9	0,22

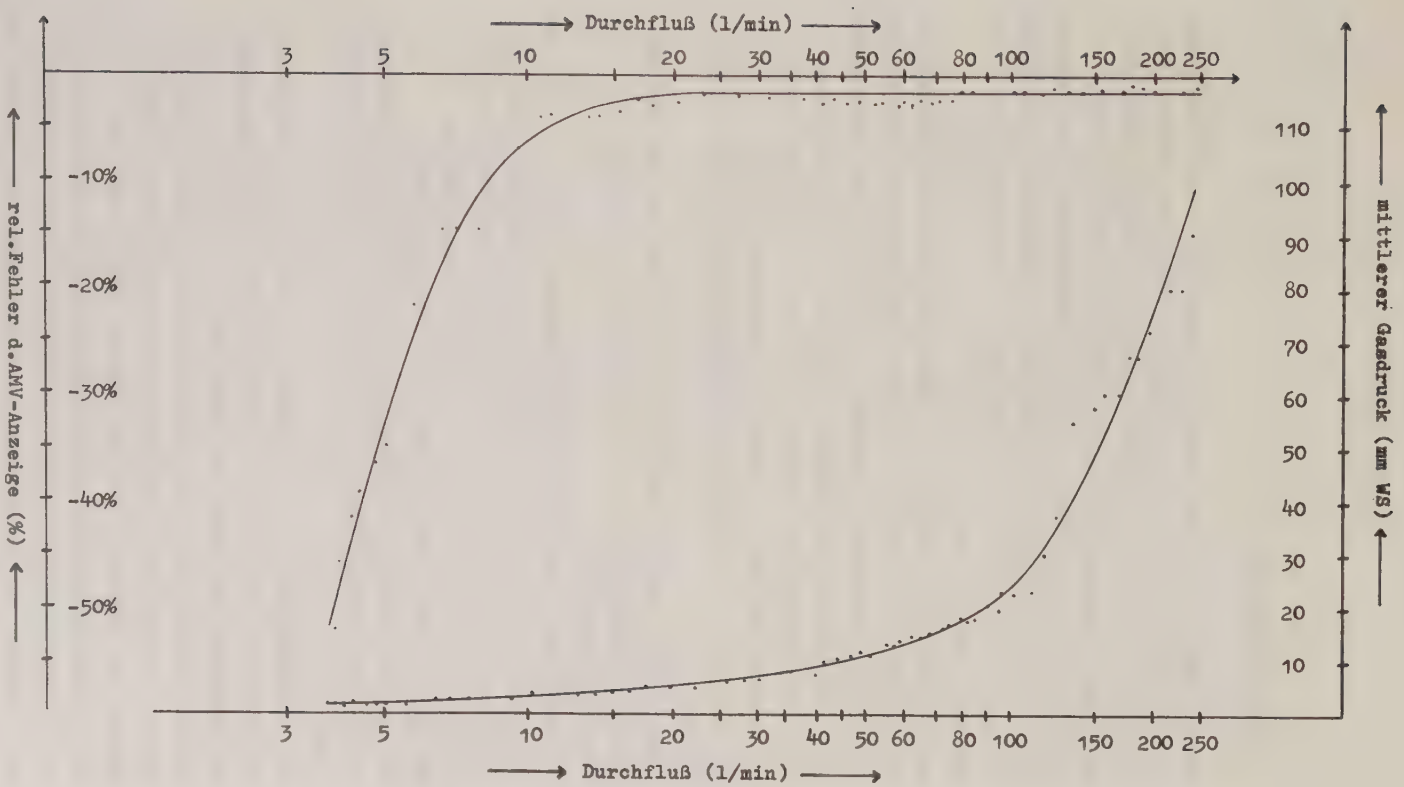


Abbildung 5: Relativer Fehler der AMV-Anzeige zum Eichwert (%) und mittlerer Gasdruck vor dem t-Oxycon (mm WS) bei steigenden Durchflußraten (l/min)

6.2. ΔO_2-Messungen

Während das OXYCON-P die Atemzeitvolumina unter ATPS-Bedingungen (6.1.) bestimmt und digital anzeigt, sind die ΔO_2-Anzeigewerte des OXYCON-P schon auf STPD-Bedingungen umgerechnet. Dies wird durch einen eingebauten Thermobarometer erreicht, der während eines Versuches auftretende Temperaturveränderungen fortlaufend mißt und ins Anzeigeergebnis einrechnet. Zur Kontrolle kann durch Umschalten auf "corr. fact." der jeweilige Umrechnungsfaktor angezeigt werden (20).

Bei den ΔO_2-Messungen mit vier verschiedenen Eichgaskonzentrationen wurden zwei Ziele verfolgt: einmal wurde die Meßgenauigkeit des O_2-Analysators unabhängig von der Zeitdauer untersucht, zum anderen wurde die Zeitdauer registriert, die die Oxyconanzeige pro Durchflußrate benötigte, um den identischen oder einen maßgebenden ΔO_2-Wert zu erreichen (Einstellzeit).

Den ersten Teil, die Meßgenauigkeitsüberprüfung, gibt Tabelle 4 wieder.

Bemerkenswert war die Tatsache, daß sich bei den vier Versuchsreihen jeweils nur ein einziger ΔO_2-Wert (ΔO_2-Ist-Wert in Tabelle 4) einstellte.

Die relativen Abweichungen liegen zwischen -9,1% und +3,4%. Ein systematischer Fehler ist dabei nicht zu entdecken, obwohl bei der höchsten O_2-Konzentration (20,17 Vol%) die Abweichung am größten ist. Keine Abweichung vom Sollwert ist dagegen bei der mittleren O_2-Konzentration von 17,73 Vol% aufgetreten.

Bei der Bestimmung der Einstellzeit ergeben sich demgegenüber ganz erhebliche Größenunterschiede, die aus Tabelle 5 ersichtlich sind.

Um die Ergebnisse der vier Versuche in Tabelle 5 übersichtlicher zu gestalten, wurden sie in die Schaubilder 6a-6d übertragen. Die gestrichelten Linien mit einem Ordinatenabstand von drei Minuten stellen die in der Gebrauchsanweisung (20) geforderten drei Minuten dar, die ein Proband vor der eigentlichen Untersuchung ins tragbare Teil des OXYCON-P exspirieren soll, um eine gute Durchmischung der Atemgase im Gasmischbehälter zu erreichen (5.1.1. und Abbildung 1). Auf Grund dieser Empfehlung müßte in den Versuchen nach einer Einstellzeit von drei Minuten regelmäßig

Tabelle 4: Abweichung der ΔO_2-Anzeige (Ist-Wert) vom Soll-Wert (20,94 Vol% minus Eichgaskonzentration) bei vier verschiedenen Eichgaskonzentrationen

	1. Versuch (20,17 Vol%)	2. Versuch (19,20 Vol%)	3. Versuch (17,73 Vol%)	4. Versuch (16,00 Vol%)
ΔO_2-Soll (Vol%)	0,77	1,74	3,21	4,94
ΔO_2-Ist (Vol%)	0,70	1,80	3,21	4,89
Abweichung (%)	-9,10	+3,40	0,00	-1,00

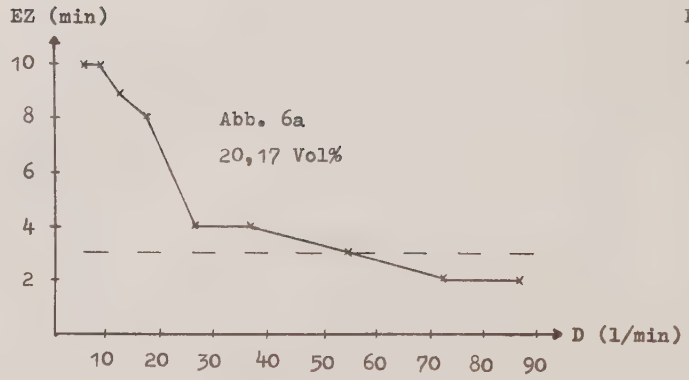
der identische bzw. ein maßgebender Wert erreicht sein. Tatsächlich ist dies jedoch erst zwischen 26,2 l/min (Versuch 1) und 35,9 l/min (Versuch 4) der Fall (siehe Tabelle 5 unter EZ 4 Minuten sowie Abbildung 6a-6d).
Die Abhängigkeit der ΔO_2-Einstellzeiten von den Durchflußraten läßt sich nach: $x \cdot y$ = konstant darstellen (Abbildung 7). Die Konstante errechnet sich aus Mittelwerten der Produkte von Einstellzeit und Durchflußrate und beträgt 124,93. Somit läßt sich mit Hilfe der Gleichung

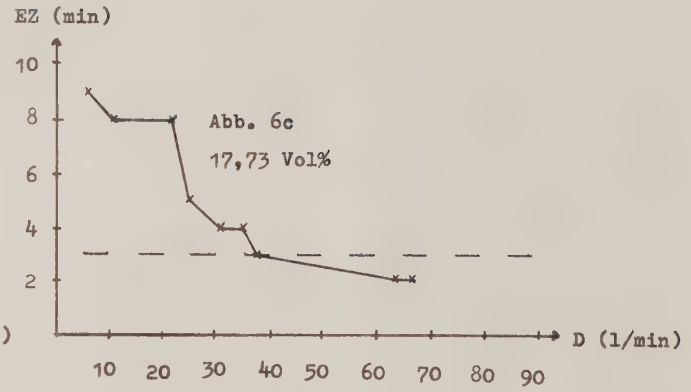
$$y = \frac{124{,}93}{x} + 1$$

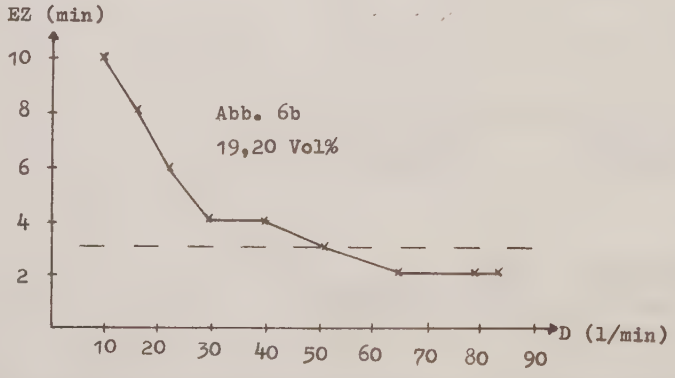
bei bekannter Durchflußrate die jeweilige ΔO_2-Einstellzeit berechnen bzw. annähernd aus Abbildung 7 ablesen.

Tabelle 5: Dauer der ΔO_2-Einstellzeiten (EZ in min) in Abhängigkeit von der Durchflußrate (D in l/min)

1. Versuch (20,17 Vol%)		2. Versuch (19,20 Vol%)		3. Versuch (17,73 Vol%)		4. Versuch (16,00 Vol%)	
D	EZ	D	EZ	D	EZ	D	EZ
5,6	10	9,2	10	6,9	9	7,0	10
8,1	10	15,7	8	10,1	8	14,8	9
11,8	9	21,5	6	21,8	8	17,9	5
16,9	8	29,0	4	25,0	5	24,8	5
26,2	4	39,2	4	30,4	4	35,9	4
36,0	4	50,7	3	35,5	4	38,7	3
54,7	3	64,0	2	38,5	3	64,1	2
72,8	2	78,4	2	63,1	2	65,6	2
86,5	2	82,4	2	66,1	2	75,5	2







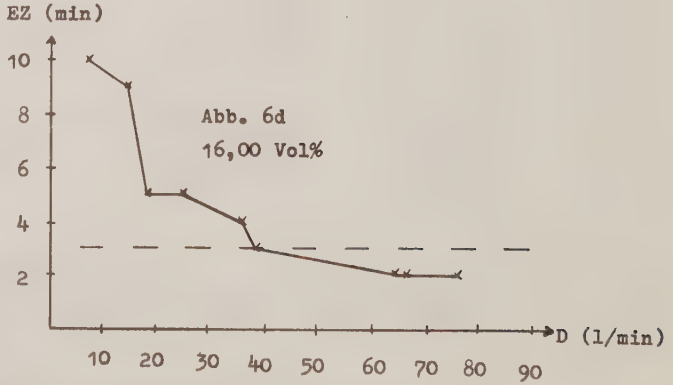


Abbildung 6a - 6d: Einstellzeiten der ΔO_2-Anzeige (min) bei verschiedenen O_2-Konzentrationen in Abhängigkeit von den Durchflußraten (l/min)

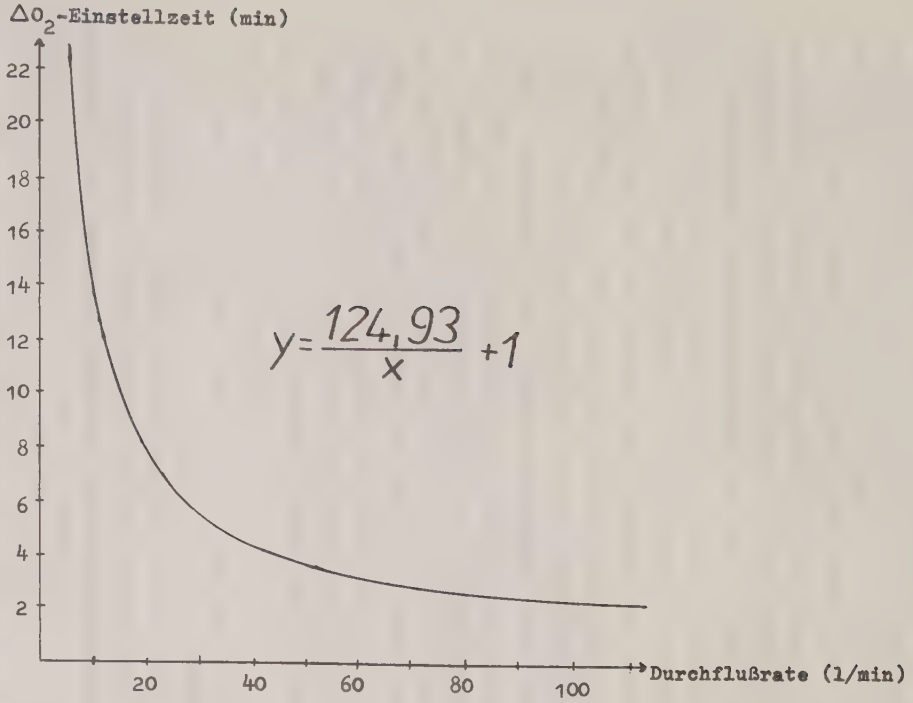


Abbildung 7: Einstellzeiten der ΔO_2-Anzeige (min) in Abhängigkeit von den Durchflußraten (l/min)

7. DISKUSSION

7.1. AMV

Die leistungsphysiologisch interessierenden Atemminutenvolumina reichen bei leichter Leistung bis etwa 30 l/min, bei mittelschwerer bis 60 l/min, bei schwerer bis 105 l/min, bei kurzfristigen Spitzenleistungen sogar bis 200 l/min (Tabelle 1).
Für den Vergleich von an Versuchspersonen gemessenen exspiratorischen Atemminutenvolumina mit den kontinuierlich erzeugten Gasdurchflußraten in unseren Versuchen muß man in Betracht ziehen, daß ein Proband während der Messung einer Zeiteinheit, z.B. einer Minute, etwa die Hälfte dieser Zeiteinheit einatmet, die andere Hälfte ausatmet. Das bedeutet, daß bei exspiratorisch gemessenen Atemminutenvolumina von z.B. 5 bzw. 60 l/min etwa doppelt so hohe Durchflußraten von mindestens 10 bzw. 120 l/min zu erwarten sind. Umgekehrt entsprechen die von uns experimentell erzeugten Durchflußraten von beispielsweise 10 l/min einem Atemminutenvolumen von ca. 5 l/min, also einer Ruheatmung.
Unter diesen Gesichtspunkten ist - wie Abbildung 5 zeigt - die Anzeigegenauigkeit des Atemminutenvolumens beim OXYCON-P sehr groß. Lediglich bei Atemminutenvolumina, die bei Ruhe (3-6 l/min AMV ≙ 6-12 l/min Gasdurchfluß) auftreten, kommt es zu gröberen Verfälschungen der Meßwerte (Tabelle 3a).

7.2. Gasdruck

Die mittleren Gasdrücke im Meßsystem steigen mit zunehmenden Durchflußraten deutlich an (Abbildung 5). Diese Ergebnisse decken sich mit denen, die früher an ähnlichen Geräten festgestellt worden sind (6, 8, 9, 10).
Praktisch bedeuten die gemessenen Gasdrücke Atemwiderstände, die die Versuchsperson zusätzlich zu den geforderten ergometrischen Belastungen zu überwinden hat, also eine zusätzliche Atemarbeit. Matthes (6) stellte in diesem Zusammenhang fest, daß bei Atemwiderständen zwischen 20 und 100 mm WS Atemminutenvolumina und Sauerstoffverbrauch kontinuierlich zunehmen. Oberhalb dieser Grenze wird zunehmend anaerobe Arbeit geleistet, um die großen

Atemwiderstände zu überwinden.
Ein Atemwiderstand von 20 mm WS ist nach unseren Untersuchungen bei einer Durchflußrate von 94 l/min, also bei einem vergleichbaren Atemminutenvolumen von etwa 47 l/min erreicht. Das bedeutet, daß bereits bei mittelschweren Belastungen und erst recht bei Hoch- und Höchstleistungen statt der zu untersuchenden Belastung zu einem steigenden Prozentsatz die verstärkte Atemarbeit zur Überwindung der beachtlichen Gasdrucke vor dem t-Oxycon gemessen wird. Da Matthes beträchtliche interindividuelle Streuungen nachweisen konnte, ist dieser Fehler auch durch einen Korrekturfaktor nicht zu beheben.

7.3. ΔO_2-

Die ΔO_2-Anzeige des OXYCON-P wurde mittels vier verschiedener O_2-Konzentrationen, die leistungsphysiologisch von Interesse sind, überprüft. Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, ist die Meßgenauigkeit des O_2-Analysators trotz gewisser konzentrationsabhängiger Schwankungen insgesamt hoch und für klinische und wissenschaftliche Fragestellungen ausreichend.
Dagegen ist die Einstellzeit - die Zeit bis der optimale Wert erreicht ist - ganz wesentlich von der Durchflußrate abhängig. Aus Tabelle 5 und Abbildung 7 ist zu ersehen, daß die Einstellzeit unterhalb einer Durchflußrate von 50 l/min in jedem Fall mindestens drei Minuten, unter 10 l/min sogar zehn Minuten beträgt. Selbst oberhalb einer Durchflußrate von 60 l/min wird in jedem der zahlreichen Teilversuche der reale Endwert erst nach zwei Minuten erreicht. Dabei ist zu bedenken, daß eine Durchflußrate von 60 l/min bereits einem exspiratorischen AMV von ca. 30 l entspricht.
Wie oben aufgeführt ist für kontinuierliche Analysen bei spiroergometrischen Untersuchungen aber Bedingung, daß die Einstellzeit kürzer sein muß als die Geschwindigkeit der Änderung, die man untersucht. Da in der Ergometrie die Änderungen in Minutenabständen interessieren und registriert werden sollen, wird diese Bedingung nicht erfüllt.
Die Eichgaskonzentration ist für die Verzögerung der Einstellzeit offensichtlich ohne Bedeutung.

7.4. Gesamtbeurteilung

Trotz einer hohen technischen Meßgenauigkeit haften dem Gerät im praktischen Einsatz erhebliche Fehler an, die sowohl in seinen Gasdrücken als auch den verzögerten Einstellzeiten der Sauerstoffanzeige liegen. Somit gestattet das Gerät allenfalls eine Annäherung an die realen Belastungsparameter, ist damit den preiswerten indirekten Methoden wie z.B. der Herzfrequenzmessung keinesfalls überlegen und kann in dieser Konzeption nicht empfohlen werden.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Das OXYCON-P ist ein tragbares Seriengerät zur kontinuierlichen Messung des Atemminutenvolumens und der Sauerstoffaufnahme. Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, seine Anzeigegenauigkeit des Atemminutenvolumens und der Sauerstoffanzeige sowie die auftretenden Atemwiderstände zu überprüfen.

Zu diesem Zweck wurden bei den AMV-Messungen mittels Elektropumpe und Preßluftflaschen steigende Durchflußraten von 3,9 l/min bis 242 l/min erzeugt, mit Hilfe eines Experimentiergaszählers geeicht und zur Messung dem OXYCON-P zugeführt. Vor der Gasuhr war ein Gasmanometer im Schlauchsystem integriert, um die Gasdruckverhältnisse zu objektivieren.

Bei der Genauigkeitsüberprüfung der Sauerstoffmessung kamen Sauerstoffflaschen mit vier verschiedenen geeichten O_2-Konzentrationen zur Anwendung. Diese wurden direkt mit dem OXYCON-P verbunden. Für jede dieser O_2-Konzentrationen wurden mehrere Teilversuche bei ansteigenden Durchflußraten (von 6 l/min bis 86 l/min) durchgeführt.

Auf Grund der Versuchsergebnisse läßt sich zusammengefaßt feststellen:

Während die Anzeigegenauigkeit des Atemminutenvolumens hoch ist, sind die Einstellzeiten der Sauerstoffanzeige von der Durchflußrate abhängig und mehr oder minder stark verzögert. Eine exakte Sauerstoffanzeige in Minutenabständen ist damit nicht möglich.

Bei Atemminutenvolumina von mehr als 47 l/min ist wegen des zunehmenden Strömungswiderstandes mit einer Erhöhung des Sauerstoffverbrauchs zu rechnen. Diese beiden Fehlerquellen können zu erheblichen Verfälschungen der Meßwerte führen.

LITERATURVERZEICHNIS

1 Albers, C.: Messung von Gaskonzentrationen in der Gasphase. In: König, W. (Hrsg.): Klinisch-physiologische Untersuchungsmethoden. Stuttgart: Thieme 1972 (S. 124 ff.)

2 Barrow, G.M.: Physikalische Chemie
2. Aufl. Heidelberg, Wien: Bohmann 1974

3 Harten, H.-U.: Physik für Mediziner
2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1975

4 Hüllemann, K.-D., List, M.: Nutzung des polarographischen Prinzips für telemetrische Sauerstoffbestimmungen. Med. Technik 4, 78-80 (1973)

5 Kofranyi, E., Michaelis, H.F.: Ein tragbarer Apparat zur Bestimmung des Gasstoffwechsels. Arbeitsphysiologie 11, 148-150 (1950)

6 Matthes, H.V.: Die Bedeutung des Atemwiderstandes für die Messung des respiratorischen Stoffwechsels. Arbeitsphysiologie 11, 117-128 (1941)

7 Mäurer, H.-Chr.: Biotelemetrie. In: König, W. (Hrsg.): Klinisch-physiologische Untersuchungsmethoden. Stuttgart: Thieme 1972 (S.272 ff.)

8 Mellerowicz, H.: Ergometrie
2. Aufl. München, Berlin, Wien: Urban und Schwarzenberg 1975

9 Montoye, H.J., van Huss, W.D., Reineke, E.P., Cockrell, J.: An investigation of the Müller-Franz Calorimeter. Arbeitsphysiologie 17, 28-33 (1958)

10 Müller, E.A., Franz, H.: Energieverbrauchsmessungen bei beruflicher Arbeit mit einer verbesserten Respirationsgasuhr. Arbeitsphysiologie 14, 499-504 (1952)

11 Nöcker, J.: Physiologie der Leibesübungen 3. Aufl. Stuttgart: Enke 1976

12 Opitz, E., Bartels, H.: Gasanalyse. In: Lang, K., Lehnartz, E.: Handbuch der physiologisch- und pathologisch-chemischen Analyse. 10. Aufl. Berlin: Springer 1955

13 Plenert, W., Heine, W.: Normalwerte 4. Aufl. Berlin: VEB Volk und Gesundheit 1973

14 Schneider, M.: Einführung in die Physiologie des Menschen 16. Aufl. Berlin, Heidelberg, NewYork: Springer 1971

15 Smidt, U., v. Nieding, G., Löllgen, H.: Methodische Probleme der Atemgasmessung. Biomed. Technik 21, 102-114 (1976)

16 Stegemann, J.: Leistungsphysiologie 2. Aufl. Stuttgart: Thieme 1977

17 Ulmer, W.T., Reichel, G., Nolte, D.: Die Lungenfunktion 2. Aufl. Stuttgart: Thieme 1976

18 Valentin, H., Klosterkötter, W., Lehnert, G., Petry, H., Rutenfranz, J., Wittgens, H.: Arbeitsmedizin Stuttgart: Thieme 1971

19 Woitowitz, H.-J.: Spirographie. In: König, W. (hrsg.): Klinisch-physiologische Untersuchungsmethoden. Stuttgart: Thieme 1972 (S. 253 ff.)

20 Verschiedene Unterlagen über das OXYCON-P der Fa. Hellige

Lebenslauf

Am 20. Dezember 1952 wurde ich, Karl-Heinz Eger, als Sohn des Guido Eger in Schwäbisch Hall geboren. Eingeschult wurde ich im Frühjahr 1959. Mein Abitur bestand ich im Juni 1971.

Im Wintersemester 1971/72 begann ich an der Universität Hohenheim das Medizinstudium. Dort absolvierte ich das Vorphysikum. Ab Wintersemester 1972/73 studierte ich an der Universität Tübingen weiter und legte hier mein 3. Staatsexamen am 26. April 1978 ab.

Bis Februar 1980 war ich als Truppenarzt eines Fallschirmjäger-Bataillons tätig. Während dieser Zeit besuchte ich die drei Arbeitsmedizinischen Kurse an der Bayerischen Akademie für Arbeits- und Sozialmedizin in München. Seit 3. März 1980 arbeite ich als Stationsarzt in der Landesklinik Nordschwarzwald auf einer geronto-psychiatrischen Abteilung.

Herstellung:
Sprint-Druck GmbH
7000 Stuttgart-30
Wienerstr. 117, Tel. 81 26 69

Sprint-Druck GmbH
7000 Stuttgart 30
Wiener Str. 117
Tel. 0711/81 26 69